

RELACIONES DE RECURRENCIA, APLICACIÓN A LA PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ECUADOR.

Roberto Aguiar F., Magaly Quishpe y Daissy Quishpe

Centro de Investigaciones Científicas
Universidad de Fuerzas Armadas (UFA)
Quito- Ecuador raguiar@espe.edu.ec

RESUMEN

Se presenta la Teoría de Poisson orientada al cálculo de la Peligrosidad Sísmica empleando Métodos Probabilísticos, con el propósito de que se conozca más sobre este modelo y a futuro se utilicen con más propiedad programas para evaluar la amenaza sísmica.

Luego se indica en forma resumida las zonas fuentes encontradas para el Ecuador para sismos corticales (Aguiar, 2009) y el cálculo de las ventanas de tiempo en las cuales se considera que la información sísmica es estable, aplicando el Método de Stepp en forma gráfica y analítica.

Posteriormente, se presenta las relaciones de recurrencia, para tres zonas fuente tipo de Ecuador que están asociadas a sismos: corticales, interplaca tipo thrust e intraplaca. Para cada una de estas zonas fuentes se determina las relaciones de recurrencia de: Richter y Gutenberg (1944), Cornell y Vanmarcke (1969), Wesnousky (1994), Zoller *et al.* (2008).

Finalmente se comparan las relaciones de recurrencia encontradas en este estudio para las tres zonas fuentes anotadas en el párrafo anterior, con las encontradas para Chile por Silva (2008) encontrando que las pendientes de las curvas de recurrencia son muy parecidas.

Palabras Claves.- Relación de recurrencia para Ecuador; Sismos interplaca tipo thrust; Sismos corticales; Sismos intraplaca.

ABSTRACT

Poisson Theory is presented focused on the calculation of Seismic Hazard using Probabilistic Methods, in order to know more about this model and to use programs with correct criteria to evaluate the seismic threaten.

After that the source zones, found for Ecuador, are briefly indicated for cortical earthquakes and the calculation of time windows, where the seismic information is considered stable, applying Stepp Method graphically and analytically.

Subsequently, the recurrence relations are presented, for three typical source zones of Ecuador which are related to: cortical earthquakes; interplate earthquakes of thrust type and interplate earthquakes. For each source, the recurrence relations are determined from: Richter and Gutenberg (1944), Cornell and Vanmarcke (1969), Wesnousky (1994), Zoller *et al.* (2008).

Finally the recurrence relations, found in this study for the three source zones written down above, are compared with those found for Chile by Silva (2008), discovering that slopes of the recurrence curves are quite similar.

Key Words.- Recurrence Relation for Ecuador; Interplate Earthquakes of Thrust type; Cortical Earthquakes; Interplate Earthquakes.

1. INTRODUCCIÓN

La sismicidad en una determinada área fuente puede ser modelada como un Proceso Estocástico de Poisson. Por este motivo se recuerda que el Proceso de Poisson, también conocido como *Ley de los sucesos raros*, es un proceso estocástico de tiempo continuo que consiste en contar eventos raros que ocurren a lo largo del tiempo; en este caso los eventos raros son los sismos que pueden tener diferentes magnitudes y pueden ocurrir en cualquier instante de tiempo.

Se dice que el modelo de Poisson es un modelo sin memoria de tal forma que la ocurrencia de un sismo el 1 de enero de 2011, en una determinada área fuente no tiene ningún efecto sobre el número de sismos que pueden ocurrir durante todo el mes de enero de 2011. El número total de sismos que se registren en el mes es aleatorio y este valor mensual se considera constante durante todo el año. En los modelos con memoria si influye el hecho de que se registro un sismo el 1 de enero de 2001, en el cálculo del número total de sismos mensual y anual. **Por consiguiente en el modelo de Poisson, no se altera la evaluación de la Peligrosidad Sísmica, si se tiene un largo período de tiempo sin sismos.**

La función de distribución del modelo de Poisson, viene definido de la siguiente manera:

$$P(n \geq M) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (1)$$

Donde $P(n \geq M)$ es la probabilidad de que en una determinada área fuente ocurran n sismos con magnitud mayor o igual a M en el intervalo de tiempo $(0, t)$; $\lambda(M)$ es el número medio de temblores con magnitud mayor o igual a M , que pueden registrarse en esa fuente. Un proceso de Poisson debe satisfacer las siguientes hipótesis. (Ruiz, 1985).

- i. **Estacionariedad.-** La probabilidad de un evento en un intervalo corto de tiempo $(t, t + \Delta t)$ es aproximadamente $\lambda \Delta t$ para cualquier t . **Es decir no importa qué tiempo t se elige para hacer la estimación.**
- ii. **No multiplicidad.-** La probabilidad de 2 o más eventos en un intervalo corto de tiempo es despreciable comparando con $\lambda \Delta t$.
- iii. **Independencia.-** El número de eventos en cualquier intervalo de tiempo es independiente de el número en cualquier otro intervalo de tiempo.

La distribución de Poisson es una función asimétrica en la cual el valor medio es igual a λ y la desviación estándar $\sigma = \sqrt{\lambda}$. Si $n = 0$ (Probabilidad de no ocurrencia de sismos) se tiene, al reemplazar en la ecuación (1), lo siguiente:

$$P(0) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Donde $P(0)$ es la probabilidad de no tener sismos de magnitud mayor o igual a M , en el intervalo de tiempo t . Por lo tanto, la probabilidad de que ocurran sismos con magnitud mayor o igual a M en el intervalo de tiempo t , vale:

$$P(n) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Tanto en la ecuación (2) como en la ecuación (3) se debió colocar λ_M en lugar de λ , debido a que se está encontrando la probabilidad de no tener o de tener sismos con magnitud mayor o igual a M .

Sea T la variable aleatoria del tiempo en que ocurre un sismo de magnitud M . Entonces la probabilidad de que T exceda algún valor de t es igual a la que no ocurran sismos en el intervalo de tiempo t , o sea es igual a $1 - P_T(t) = P(0)$. De donde:

$$P_T(t) = 1 - \exp(-\lambda_M t) \quad t \geq 0 \quad (4)$$

Al derivar $P_T(t)$ con respecto al tiempo se halla la función de densidad de probabilidad $f_T(t)$, que vale:

$$f_T(t) = \frac{dP_T(t)}{dt} = \lambda_M \exp(-\lambda_M t) \quad (5)$$

Donde t es el tiempo entre sismos con magnitud mayor o igual que M y λ_M es la tasa de excedencia de la magnitud M . Luego el período de retorno T_R (tiempo esperado entre sismos de magnitud M) vale:

$$T_R = \frac{1}{\lambda_M} \quad (6)$$

2. RELACIÓN DE RECURRENCIA

La relación de recurrencia de la actividad sísmica, propuesta independientemente por Ishimoto-Ida en 1939 y Richter-Gutenberg en 1944. Tiene la siguiente forma. (Richter, 1958)

$$\log N(M) = a - bM \quad (7)$$

Donde $N(M)$ es el número de sismos con magnitud igual o mayor que M ; a, b son parámetros que se obtienen en cada área fuente aplicando regresión lineal. Se puede decir que a es igual al logaritmo del número de sismos de magnitud mayor o igual que cero y b es la proporción de sismos de una cierta magnitud. (Aguilar, 2001). De la ecuación (7) se halla:

$$\begin{aligned} N(M) &= 10^{(a-bM)} \\ \ln(N(M)) &= (a - bM) * \ln(10) \\ \ln(N(M)) &= a \ln(10) - b \ln(10) M \end{aligned}$$

Se denomina:

$$\begin{aligned} \alpha &= a \ln(10) \\ \beta &= b \ln(10) \end{aligned} \quad (8)$$

Con lo que se halla:

$$\ln(N(M)) = \alpha - \beta M \quad (9)$$

Sea λ_0 el número de sismos de magnitud mayor o igual a M_0 generados en promedio en una determinada área fuente en un tiempo t y sea $\lambda(M)$ el número el número de sismos de

magnitud mayor a M en la misma fuente y en el mismo tiempo. Ahora al utilizar la ecuación (9) se tiene:

$$\begin{aligned}\ln(\lambda_0) &= \alpha - \beta M_0 \\ \ln(\lambda(M)) &= \alpha - \beta M\end{aligned}$$

Al restar estas ecuaciones se encuentra:

$$\ln(\lambda_0) - \ln(\lambda(M)) = -\beta M_0 + \beta M$$

Al cambiar de signo y facturando el lado derecho se tiene:

$$\ln\left(\frac{\lambda(M)}{\lambda_0}\right) = -\beta (M - M_0)$$

De donde:

$$\lambda(M) = \lambda_0 e^{-\beta(M-M_0)} \quad (10)$$

El problema que tiene la ecuación (10) es que no tiene ningún límite superior para la magnitud máxima M_U .

Cornell y Vanmarcke (1969) presentan un modelo más realista para encontrar $\lambda(M)$ en lugar de la ecuación (10) y es el siguiente:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_U}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_U}} \quad (11)$$

La ecuación (11) se utiliza en algunos programas que existen para evaluar Peligrosidad sísmica, como es el caso del Programa CRISIS, en sus distintas versiones. Ordaz *et al.* (2007), cuando se utiliza la función de distribución de Poisson. Si se dibuja la ecuación (11) en papel semilogarítmico se verá que para magnitudes pequeñas es una recta con una pendiente igual a $-\beta$ lo que está en concordancia con lo observado por Gutenberg y Richter (1944), para magnitudes altas la recta se transforma en una curva cóncava hacia abajo y $\lambda(M)=0$ para magnitudes mayores a M_U .

El cálculo de los parámetros λ_0 , β , M_U se lo realiza en base a los datos del catálogo sísmico pero teniendo en cuenta el problema de la completez de la información sísmica que se presenta en el siguiente apartado. Pero al margen de esto es importante tener en cuenta las siguientes observaciones. Ordaz (2002).

- El tiempo de observación de sismos instrumentales es muy limitado. En el caso de Ecuador, las redes sísmicas empezaron a funcionar en el período 1980-2000. Además que existe incertidumbre en la ubicación de los epicentros, profundidad focal y magnitud con respecto a lo que proporciona el USGS, para algunos eventos sísmicos.
- Los catálogos sísmicos vienen en varias escalas de magnitud; M_L para los sismos registrados antes de 1960; M_b , M_s para los sismos registrados entre 1960 y el 2000; M_w para los sismos posteriores al 2000.

Por todo esto es conveniente comparar los parámetros indicados, con los encontrados en otras regiones con tectónica similar y tomar una decisión basada en la experiencia de quien

realiza el estudio de peligrosidad sísmica. Algo similar sucede cuando se calcula un edificio, los resultados que reportan los programas son referenciales, quien toma la decisión de cómo armar la estructura es el Proyectista Estructural basado en su experiencia y conocimientos, si no fuera de esta manera, estaría demás el Proyectista ya que existen programas que dibujan los planos estructurales pero esto no es así.

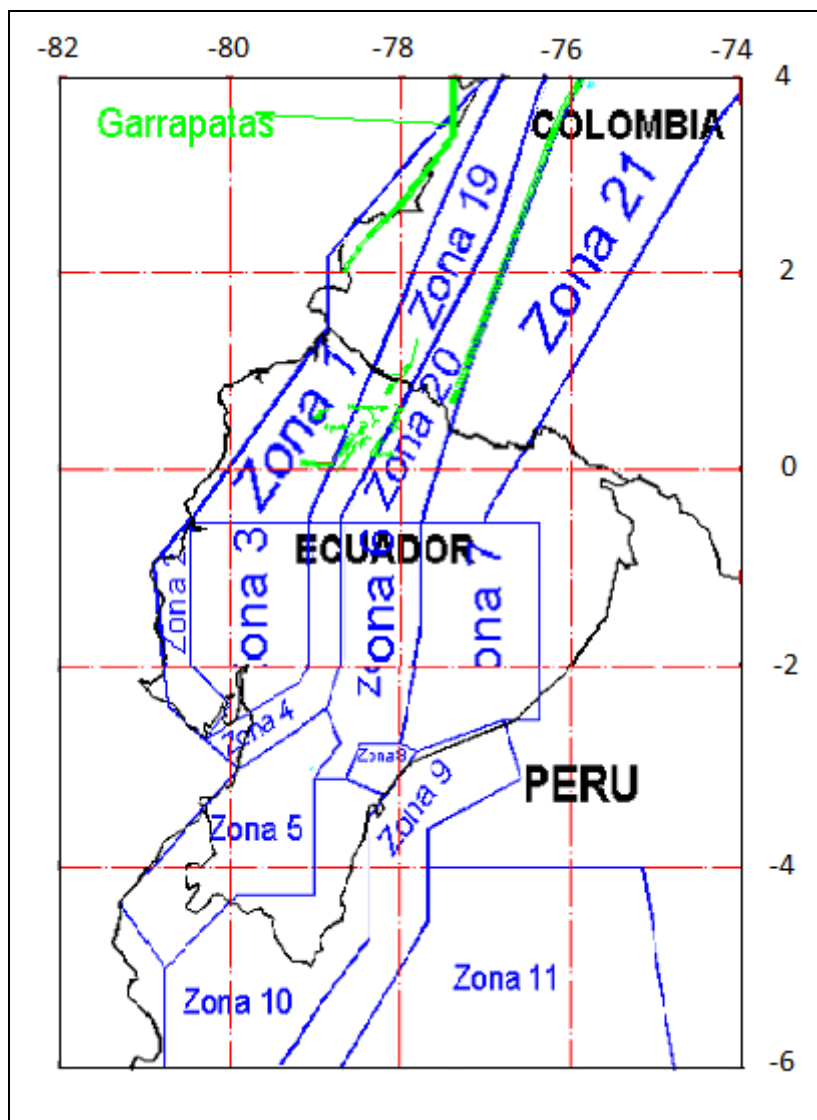


Figura 1 Zonas fuentes asociadas a sismos corticales. Aguiar (2010).

3. COMPLETEZ DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA

Si se observan los catálogos sísmicos se verá que muy pocos sismos están registrados en el período 1900-1960 de magnitudes comprendidas entre 4 y 4.5, por decir algo, una cantidad mayor se tienen registrados entre 1960-1990 y bastantes son los sismos registrados en el rango de las magnitudes anotadas con posterioridad a 1990. A esta falta de información en ciertas ventanas de tiempo se conoce con el nombre de completitud de la información sísmica.

Stepp (1973) propuso un procedimiento para determinar ventanas de tiempo en los cuales la información sísmica puede considerarse completa, basado en el criterio de estabilidad de la tasa de recurrencia, para ciertos rangos de magnitud.

El procedimiento propuesto por Stepp ha sido utilizado en trabajos recientes para evaluar la peligrosidad sísmica en: Chile, (Silva, 2008) Centro América (Molina *et al.* 2008). En el último trabajo se aplicó el Método de Stepp en forma gráfica. En Aguiar *et al.* (2011) están detallados la forma de cálculo de las ventanas de tiempo en forma gráfica y en forma analítica, aplicados a las zonas fuentes del Ecuador.

Con el propósito de explicar estos dos métodos se presenta el cálculo de las ventanas de tiempo para la Zona Fuente 2, indicada en la figura 1, destacando que no es objetivo de este artículo describir como se obtuvieron las zonas fuentes ya que están indicadas en Aguiar y Castro (2009) una primera versión reciente y en Aguiar (2010) una segunda versión.

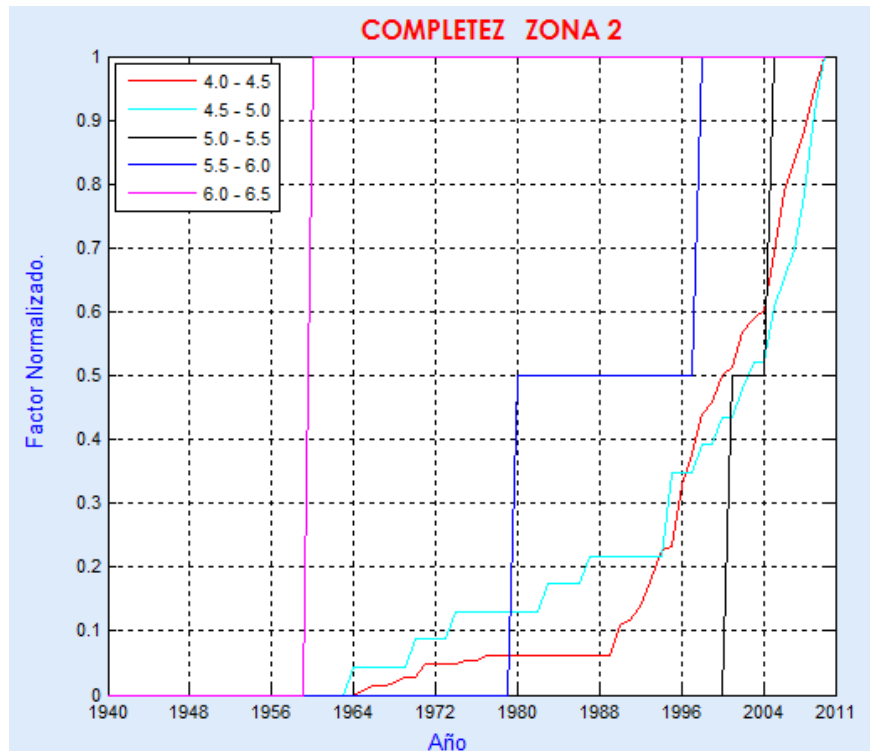


Figura 2 Número acumulado de sismos normalizados en la fuente cortical 1.

En la figura 2 se presenta el número acumulado de sismos, por rangos de magnitud, desde 1540 hasta el 2000 pero normalizados a la unidad. La ventana de tiempo es aquella en la cual la pendiente es constante, esto es lo que se debe observar en cada rango de magnitud; en la figura 2 se aprecian varias pendientes con lo cual queda de manifiesto el problema de la falta de datos en ciertas ventanas de tiempo.

En la figura 3 se ha dibujado los sismos acumulados y normalizados, con magnitudes entre 4.5 y 5.0, todo esto es del área fuente 2. Se puede ver en esta gráfica que a partir de 1990 se tiene una sola pendiente. Lugo la ventana de tiempo para los sismos entre las magnitudes indicadas es de 20 años. Lo propio se hace para cada rango de magnitud.

Ahora, en el Método de Stepp, propiamente dicho se encuentra la desviación estándar para diferentes ventanas de tiempo y para cada rango de magnitud. En la parte superior de la figura 4 se presenta este cálculo para sismos con magnitudes entre 4.5 y 5.0 de la fuente 2.

Después se debe dibujar una recta paralela a $\frac{1}{\sqrt{T_i}}$ que pase por esos puntos. Donde

T es el tiempo. El punto en el cual se logra el mejor ajuste es aquel que determina el ancho de la ventana de tiempo que en este caso es 1980. Se está trabajando en escala log-log.

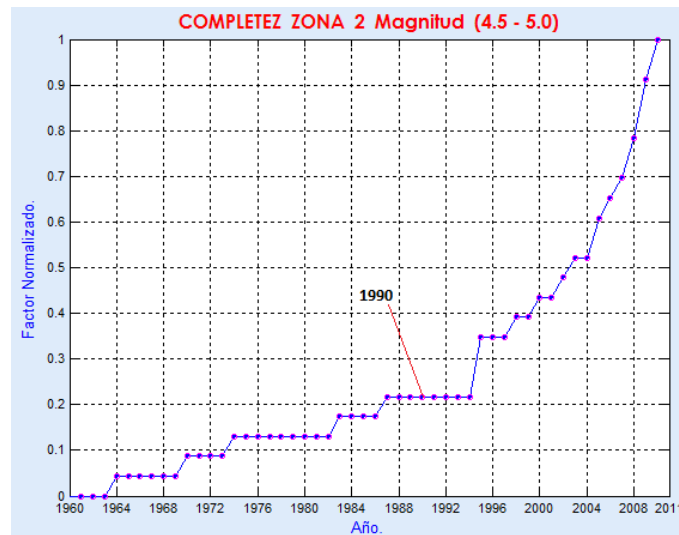


Figura 3 Resultado del estudio de completéz para sismos con magnitudes entre 4.5 y 5.0

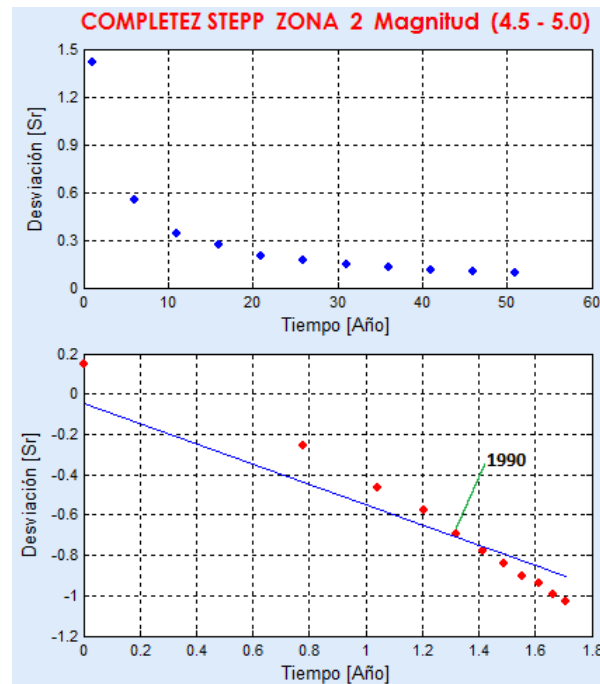


Figura 4 Resultados con el Método de Stepp, para sismos con magnitud 4.5 y 5.0

El Método de Stepp considera completa la muestra en cada rango de magnitud y específicamente en una determinada ventana de tiempo, cuando el valor medio R_i es constante y no depende del tiempo en consecuencia se comporta de la forma $\frac{1}{\sqrt{T_i}}$. El valor de R_i se obtiene dividiendo el número total de sismos encontrados en una determinada ventana de tiempo para el ancho de la ventana de tiempo.

En la tabla 1 se indican los resultados hallados para la zona fuente 2, del estudio de completéz de la información sísmica. Aguiar *et al.* (2011).

Tabla 1 Ventanas de tiempo halladas para los sismos de la Zona Fuente 2.

MAGNITUD	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0
VENTANA DE TIEMPO (años)	20	20	20	30				

Las ventanas de tiempo que se han obtenido son muy cortas, con lo que se incrementa la incertidumbre en la evaluación de la peligrosidad sísmica ya que por ejemplo, para el caso de la tabla 1 se considera en el mejor de los casos 30 años de datos sísmicos y se deja de lado valiosa información de sismos registrados en el pasado de gran magnitud.

4. RELACIONES DE RECURRENCIA

Con el propósito de ilustrar la forma de cálculo de las relaciones de recurrencia; en la tabla 2 se presenta el cálculo de los parámetros a , b , de la ecuación (7), con los datos sísmicos de la zona fuente 2 hasta diciembre de 2010, para el ajuste se considera que la Magnitud es la variable X y que el número de sismos de un determinado rango de magnitud dividido para la longitud de la ventana de tiempo es la variable Y .

Tabla 2 Cálculo de los parámetros a , b de la ley de recurrencia de Richter.

N	Magnitud	M_w	Ventanas T (años)	Número de sismos (NS)	$Y=NS/T$	Log Y	$X*\log Y$	X^2
1	4.0-4.5	4.0	20	158	7.900	0.898	3.591	16.00
2	4.5-5.0	4.5	20	25	1.250	0.097	0.436	20.25
3	5.0-5.5	5.0	20	6	0.300	-0.523	-2.614	25.00
4	5.5-6.0	5.5	30	2	0.067	-1.176	-6.469	30.25
Sumatoria		19		191	9.517	-0.533	-5.056	91.50

Las ecuaciones con las cuales se obtienen los parámetros a , b , son las siguientes (Ajuste de rectas por mínimos cuadrados).

$$\begin{aligned}\sum \log y &= N a + b \sum x \\ \sum x \log y &= a \sum x + b \sum x^2\end{aligned}\quad (12)$$

Al reemplazar los datos de la tabla 2, en la ecuación (12) se halla: $a = 6.3228$ $b = 1.3682$ Ahora bien si se grafica la ecuación (7) con los valores a , b encontrados se obtendrá una recta.

La magnitud máxima registrada en una fuente, no necesariamente se encuentra dentro de la ventana de tiempo considerada o puede ser que la magnitud máxima esperada en la fuente sea mayor a la magnitud máxima registrada. En este caso hay dos planteamientos el primero que considera que la ley de Gutenberg-Richter (GR) es bien apropiado para sismos de magnitud moderada y baja pero para sismos de magnitud alta se plantea un escalamiento prolongando la recta de la relación de GR hasta la intersección con la máxima magnitud esperada. Zoller *et al.* (2008).

El segundo criterio a partir del final de la recta que se obtiene con la ecuación (7) se traza una línea horizontal hasta el punto de corte, con una recta perpendicular a la magnitud máxima. Wesnousky (1994). Que en definitiva es otra forma de reconocer que GR es adecuado

para magnitudes medias y bajas y la forma de escalamiento para magnitudes altas es con la recta paralela, ver figura 5.

Para aplicar el criterio de Cornell y Vanmarcke (1969) indicado en la ecuación (11) se debe encontrar el valor de λ_0 que es el número de sismos con magnitud mayor a 4.0, al año. Para ello se debe obtener:

$$\alpha = a * \ln(10) = 14.5588; \quad \beta = b * \ln(10) = 3.1504; \quad \lambda_0 = \exp(\alpha - \beta M_0) = 7.0800$$

En la figura 5 se presentan las relaciones de recurrencia aplicando los tres criterios, a la izquierda el de Cornell y Vanmarcke (1969), la magnitud máxima registrada en la fuente 2 es 6.26.; al centro se tiene la relación de recurrencia con el criterio de Wesnousky (1994) y a la derecha con el criterio de Zoller *et al.* (2008). De los tres el criterio de Cornell y Vanmarcke (1969) es el que se utiliza.

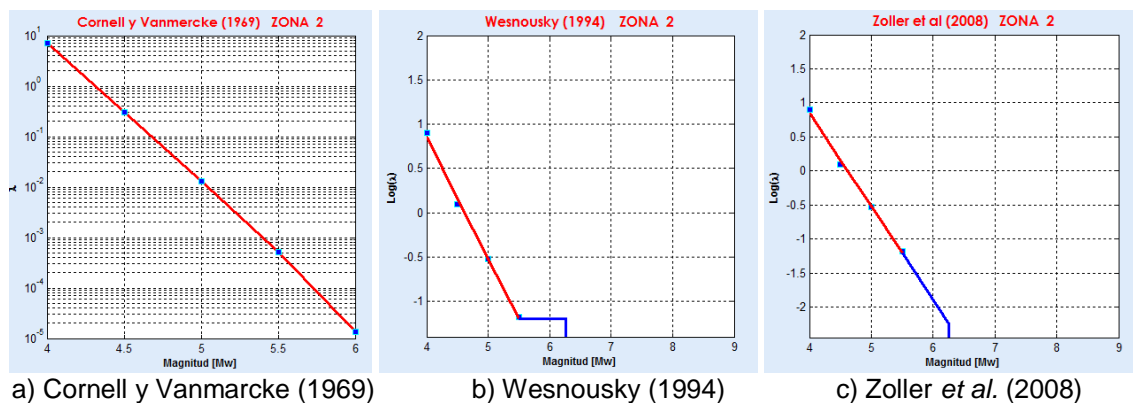


Figura 5 Relaciones de recurrencia, para zona fuente 2.

Si se reemplaza en la ecuación (1) $\lambda_0 = 7.08$, $t = 1$ y se encuentra la probabilidad de ocurrencia anual de sismos con una distribución Poisson, se obtiene la curva indicada en la figura 6, que representa la probabilidad de ocurrencia de sismos de magnitud mayor o igual a 4 en la fuente 2.

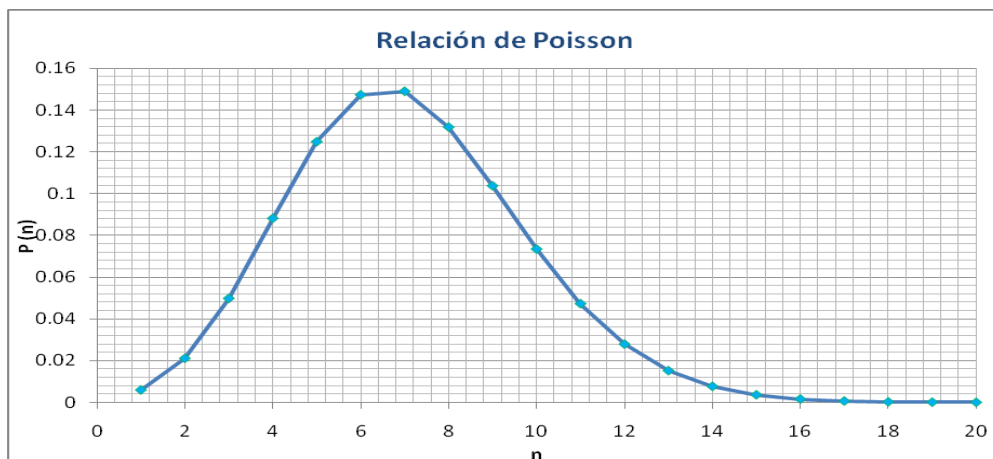


Figura 6 Probabilidad anual de ocurrencia de sismos de magnitud mayor a 4 en fuente 2.

Para $\lambda_0 \approx 7$ se obtiene la mayor probabilidad que es de aproximadamente 0.15; este es el valor medio de la función de distribución que no es simétrica. La probabilidad de que en la fuente 2 no ocurra ningún sismo de magnitud mayor a 4 es prácticamente cero (esto se observa del gráfico); ahora, al utilizar la ecuación (2) se halla que la probabilidad vale $8.41 \cdot 10^{-4}$.

También se aprecia que la probabilidad de tener más de 16 sismos al año de magnitud mayor a 4 es nula.

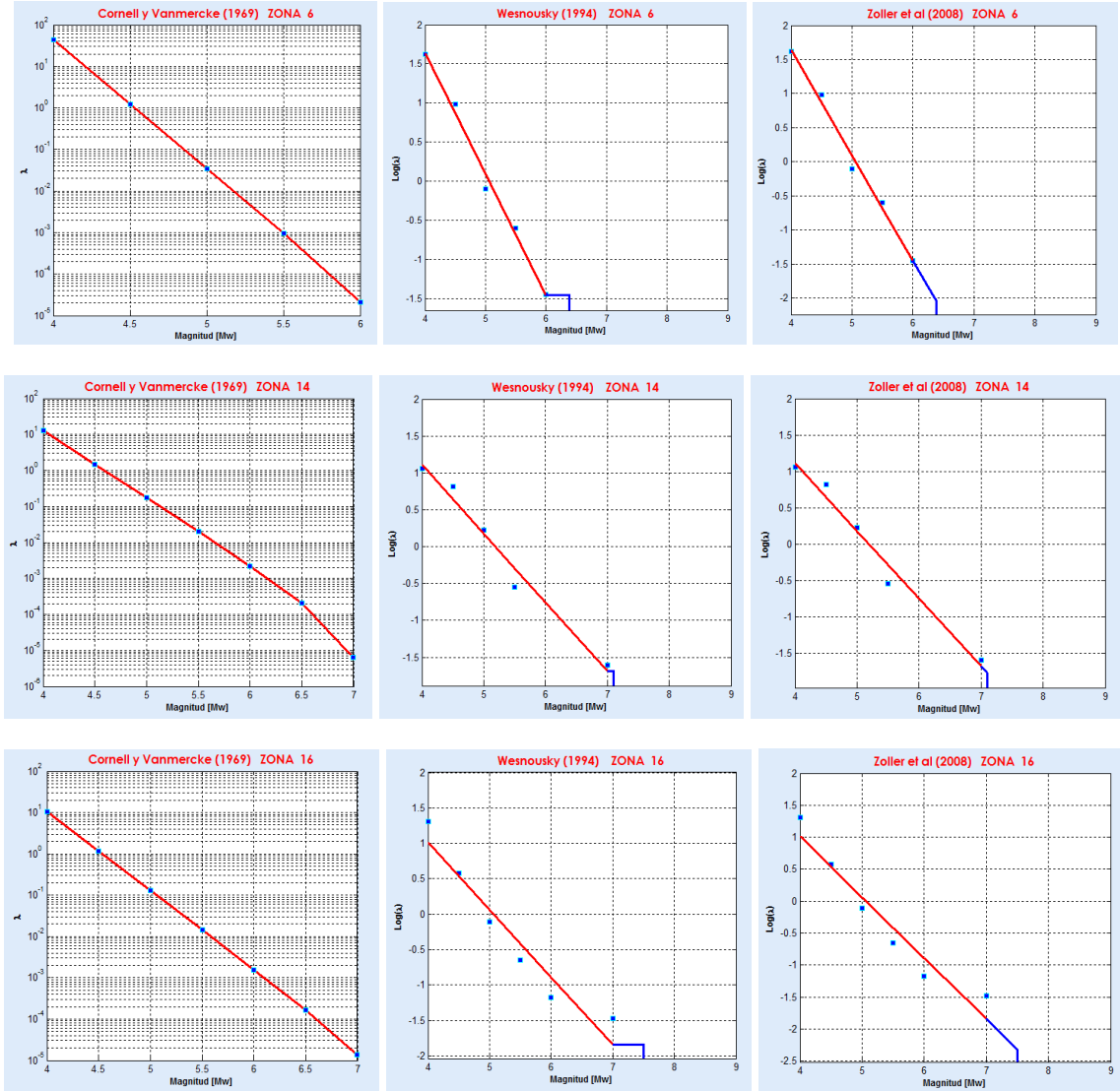


Figura 7 Relaciones de recurrencia para las zonas fuentes 6, 14 y 16.

Para posteriormente comparar las relaciones de recurrencia de los sismos de Ecuador con los sismos de Chile, se indican los valores hallados para Chile. Silva (2008).

$$\begin{aligned}\log(N) &= 5.09 - 0.865 M_S \\ \log(N) &= 5.39 - 0.965 M_S \\ \log(N) &= 5.08 - 1.061 M_S\end{aligned}\tag{13}$$

La primera de las ecuaciones identificadas con el número (13) es para sismos interplaca tipo thrust; la segunda para sismos intraplaca y la tercera para fallamiento cortical. Se destaca que están trabajando con magnitud M_S y también que para magnitudes altas se tiene que $M_W \approx M_S$. En el Ecuador se trabajó con magnitudes M_W .

5. RESULTADOS

La figura 7 presenta relaciones de recurrencia similares a los presentados en la figura 5 pero para las zonas fuentes 6, 14 y 16. Los comentarios que se pueden hacer a estas gráficas son similares a los ya realizados, cuando se presentó los resultados de la fuente 2. Únicamente quedaría pendiente indicar que la zona fuente 14 corresponde a sismos interplaca tipo thrust y la zona fuente 16 a sismos intraplaca asociados con la subducción. En la figura 1 están las fuentes asociadas a sismos corticales.

Ahora bien, en la tabla 3 se presentan los valores a , b de la ley de recurrencia de Richter; el valor de λ_0 que es la tasa de ocurrencia anual de sismos con magnitud mayor o igual que 4; el parámetro $\beta = b \ln(10)$ y la magnitud máxima M_{MAX} que ha sido registrada en la zona fuente.

Tabla 3 Parámetros que definen la sismicidad en las zonas fuentes 2, 6, 14 y 16.

ZONA	a	b	λ_0	β	M_{MAX}
2	6.3228	1.3682	7.0800	3.1504	6.26
6	7.8123	1.5444	43.1030	3.5562	6.38
14	4.8273	0.9304	12.7558	2.1423	7.10
16	4.8112	0.9499	10.2669	2.1873	7.50

Las fuentes 2 y 6 están asociadas con fallamiento cortical, la 14 con interplaca tipo thrust y la 16 con intraplaca de subducción. Con este recordatorio en la figura 8 se presentan las relaciones de recurrencia para las fuentes indicadas, aplicando el criterio de Zoller *et al.* (2008) más con la idea de tener líneas rectas. En esta figura se observa que las fuentes 14 y 16 tienen rectas que son prácticamente paralelas (valor similar de b); la fuente 14 tiene mayor sismicidad que la 16 (valor de a es mayor en la fuente 14 que en la 16).

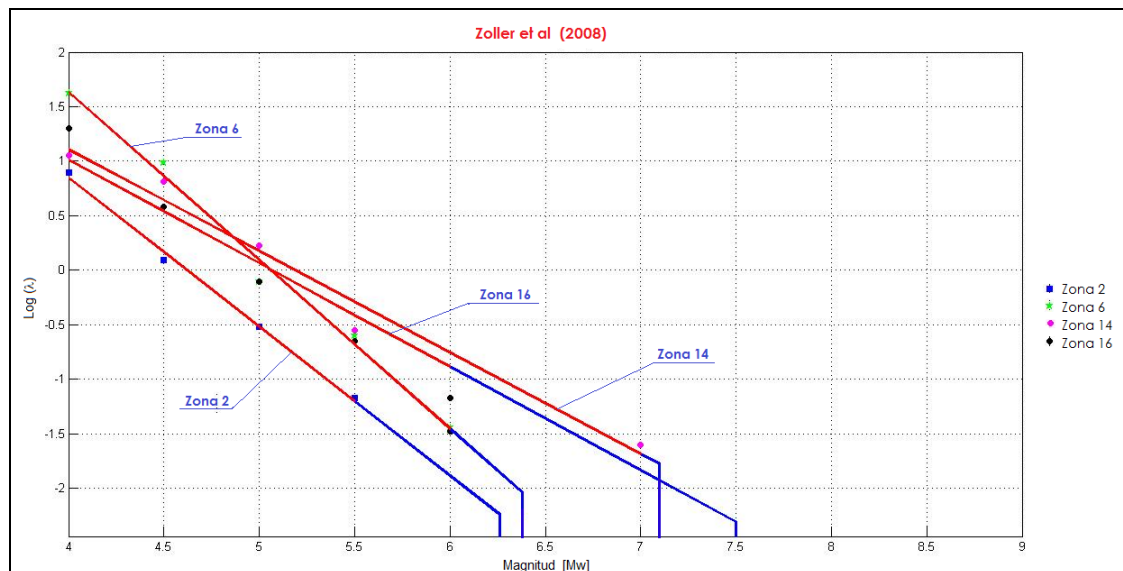


Figura 8 Relaciones de recurrencia para zonas fuentes 2, 6, 14 y 16.

En base a la figura 8 se puede indicar que en el Ecuador la mayor cantidad de sismos de magnitudes medias y altas corresponden a sismos interplaca tipo thrust; seguidos por los sismos intraplaca de subducción y finalmente los sismos corticales.

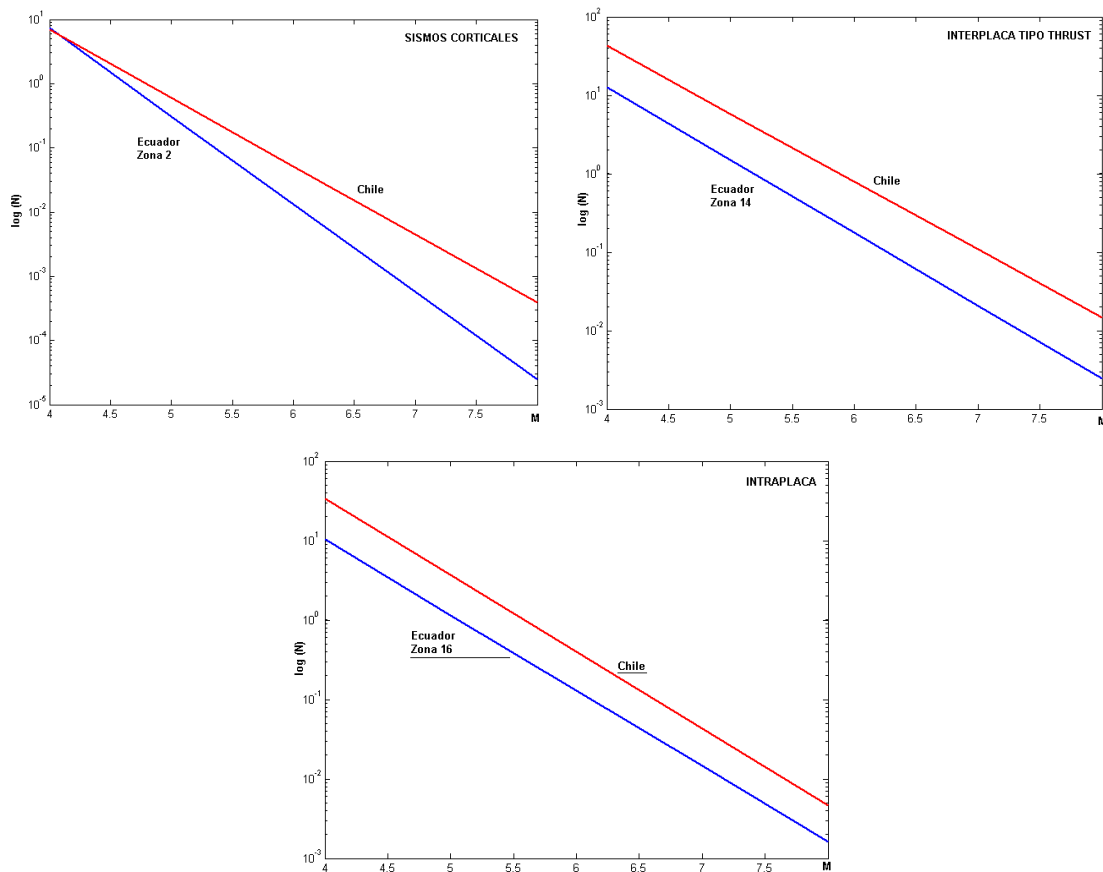


Figura 9 Relaciones de recurrencia para Ecuador y Chile.

En la figura 9 se comparan las relaciones de recurrencia encontradas para Ecuador en las zonas fuente 2, 14 y 16, con las encontradas para Chile para sismos corticales, interplaca tipo thrust e intraplaca. En forma general se puede decir que las dos rectas que contiene cada gráfica son paralelas y que Chile tiene una mayor actividad sísmica que el Ecuador. Pero lo interesante es ver la forma de las rectas que son parecidas lo cual significa que los valores encontrados para el Ecuador son correctos.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado el marco teórico con un ejemplo, de la función de distribución de Poisson orientada al cálculo de la Peligrosidad sísmica empleando Métodos Probabilísticos. Luego se ha indicado en forma resumida las zonas fuentes encontradas para el Ecuador para sismos corticales y el cálculo de las ventanas de tiempo en las cuales se considera que la información sísmica es estable, en cada rango de magnitud aplicando el Método de Stepp en forma gráfica y analítica. Todo esto con el propósito de que el lector pueda seguir el cálculo de las relaciones de recurrencia aplicando las propuestas de: Richter y Gutenberg (1944); Cornell y Vanmarcke (1969); Wesnousky (1994); Zoller *et al.* (2008), que es el objetivo del artículo.

Posteriormente, se presentan las relaciones de recurrencia, para tres zonas fuente tipo de Ecuador que están asociadas a sismos: corticales (zona fuente 2); interplaca tipo thrust (zona 14) e intraplaca (zona 16). Para cada una de estas zonas fuentes se determina las relaciones de recurrencia con cada uno de los modelos indicados en el párrafo anterior. Únicamente para el modelo de Richter y Gutenberg se han comparado los resultados obtenidos con los hallados por Silva (2008) en Chile. Del estudio realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

- Es muy importante que las relaciones de recurrencia tengan una magnitud máxima esperada. En este contexto los modelos de: Cornell y Vanmarcke (1969); Wesnousky (1994); Zoller *et al.* (2008), son adecuados.
- En el Ecuador las relaciones de recurrencia para sismos interplaca tipo thrust e intraplaca presentan pendientes paralelas.
- Se nota que las mayor sismicidad se registra en sismos interplaca tipo thrust, seguido de los intraplaca y finalmente los sismos corticales. Esta tendencia es similar a la hallada en Chile por Silva (2008).
- Las pendientes de las relaciones de recurrencia halladas en el Ecuador para sismos interplaca de bajo ángulo de buzamiento e intraplaca tienen pendientes muy parecidas a las encontradas en Chile.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., Quishpe D., Quishpe M., (2011), "Completez de la información para estudios de Peligrosidad Sísmica en el Ecuador", *VI Congreso de Ciencia y Tecnología. Escuela Politécnica del Ejército*, 88-100, Sangolquí.
2. Aguiar R., (2010), *Estudio de Peligrosidad Sísmica y Espectro de Diseño de la Presa Chontal*, Consultora ASTEC GEODATA, 30 p., Quito.
3. Aguiar R., Castro C., (2009), "Zonas fuentes para estudios de peligrosidad sísmica en el Ecuador", *Antología Científica de Ingeniería Estructural y Sísmica en Países Andinos. Consulado del Perú en el Ecuador.*, 87-111, Guayaquil.
4. Aguilar A., (2001), *CRISIS 99.1 Sistema de computo para el cálculo de Peligro Sísmico*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México., 96 p. México, D.F.
5. Cornell C., Vanmarcke E., (1969), "The mayor influence on seismic risk", *Proc., 4 WCEE, Vol I, A-1*, 69-83, Santiago de Chile.
6. Gutenberg B., Richter C., (1944), "Frequency of Earthquake in California", *Bulletin of the Seismological Society of America. BSSA*, **34**, 185-188.
7. Molina E., Marroquín G., Escobar J., Talavera E., Rojas W., Camacho E., Lindholm C., Gaspar J., Marcía M. J., Pérez M., Rivas A., García R., (2008), *Evaluación regional de la amenaza sísmica en Centro América*, Universidad Politécnica de Madrid. Proyecto con América Latina 2008, AL08-PID-038, **Informe Final**, 86 p., Madrid.
8. Ordaz M., (2002), "Sismicidad y Riesgo Sísmico", *Curso sobre Diseño y Construcción Sismorresistente de Estructuras. CENAPRED. JICA*, 19-38, México D.F.
9. Richter C., (1958), *Elementary Seismology*, Freeman, San Francisco.
10. Ruiz S., (1985), "Conceptos fundamentales de la Teoría de Probabilidades para análisis de riesgo sísmico", *XI Curso Internacional de Ingeniería Sísmica. Análisis de Riesgo Sísmico. Universidad Nacional Autónoma de México*, 20 p., México D.F.
11. Silva N., (2008), *Caracterización y determinación del peligro sísmico en la Región Metropolitana*, Tesis de Grado para obtener título de Ing. Civil. Universidad de Chile, 155 p. Santiago.

12. Stepp J.C., (1973), *Analysis of completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area, in contributions to seismic Sonic*, NOAA Tech. Report, **ERL 267-ESL30**, Washington, D.C.
13. Wesnousky S., (1994), "The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution which is it?", *Bulletin of the Seismological Society of America. BSSA*, **84**, 1940-1959.
14. Zöller, G., Hainzl, S. and Holschneider, M., 2008. "*Recurrent Large Earthquake in a Fault Region: What Can Be Inferred from Small and Intermediate Events?*". *Bulletin of the Seismological Society of America*. **98**. No. 6. 2641-2651.